

光子晶体 技术及应用

GUANGZI JINGTI JISHU JI YINGYONG

■ 刘泰康 赵亚丽 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光子晶体技术及应用

刘泰康 赵亚丽 李克训 著
刘 焘 夏晓佳 乔妙杰

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统论述了光子晶体基本理论、制备方法和最新技术。分别介绍了光子晶体基元制备和结构加工、光子晶体元器件原理及应用、光子晶体电磁屏蔽和电磁波吸收、光子晶体微带天线和相控阵天线的应用、等离子体光子晶体和光子晶体太赫兹(THz)器件等研究动态和未来发展趋势。

本书将光子晶体光学原理推广应用至整个电磁波领域,着重论述了光子晶体结构、原理及在电磁防护技术和天线技术中的应用,突出了光子晶体的独特优势。

本书适于相关研究人员及工程技术人员使用,也可供相关专业研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据



光子晶体技术及应用/刘泰康等著. —北京:国防工业出版社,2015.1

ISBN 978-7-118-09508-1

I. ①... II. ①刘... III. ①光学晶体—研究

IV. ①07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 285094

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 710×1000 1/16 插页 2 印张 11½ 字数 213 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

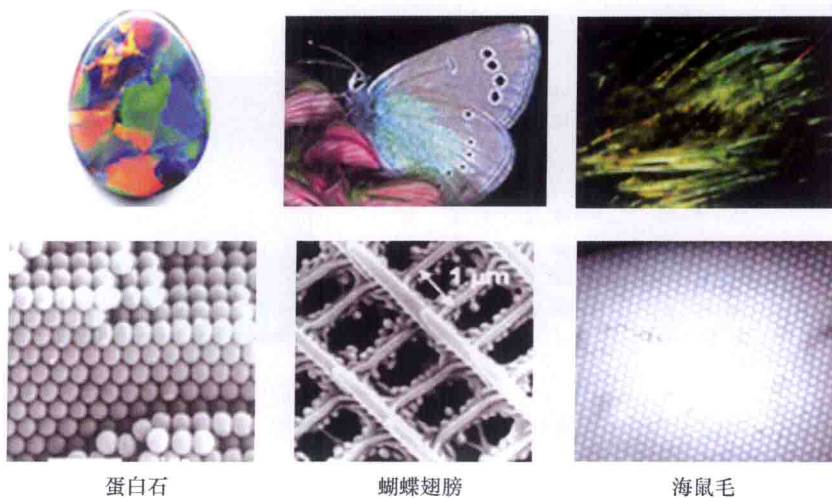


图 1.1 光子晶体在自然界中的例子

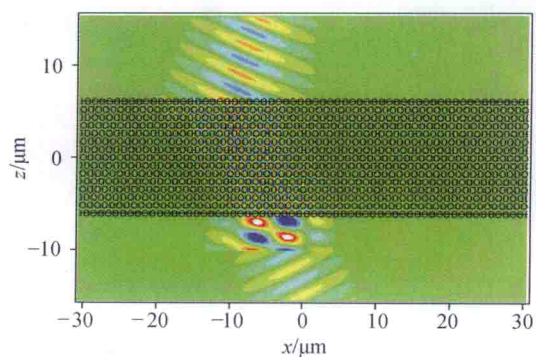


图 1.2 光子晶体中的负折射现象

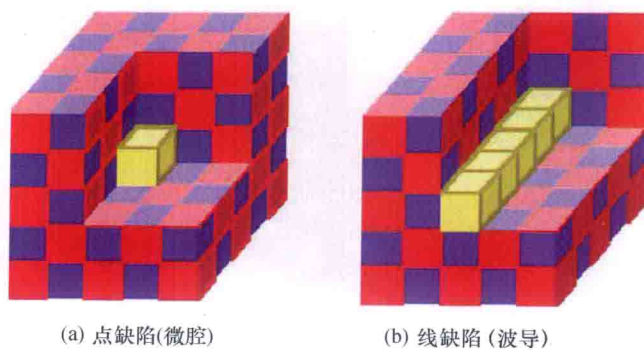


图 1.7 光子晶体的缺陷

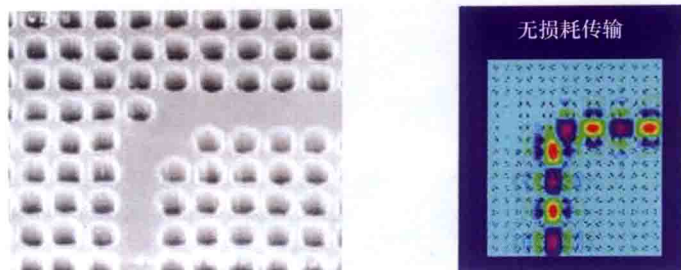


图 1.8 光子晶体波导的弯曲

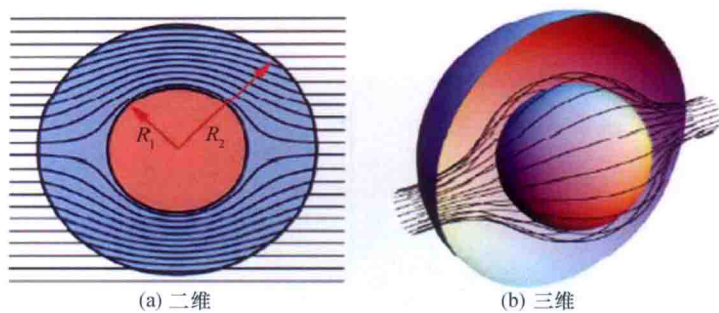


图 1.9 隐身斗篷的隐身原理

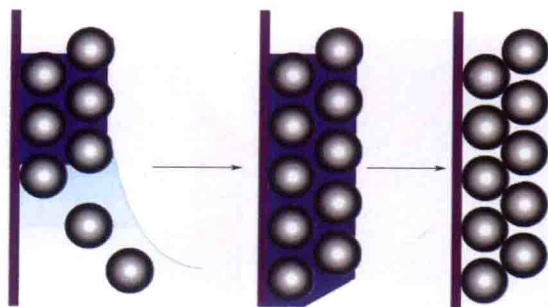


图 4.6 一种改进的垂直沉积组装胶体晶体方法

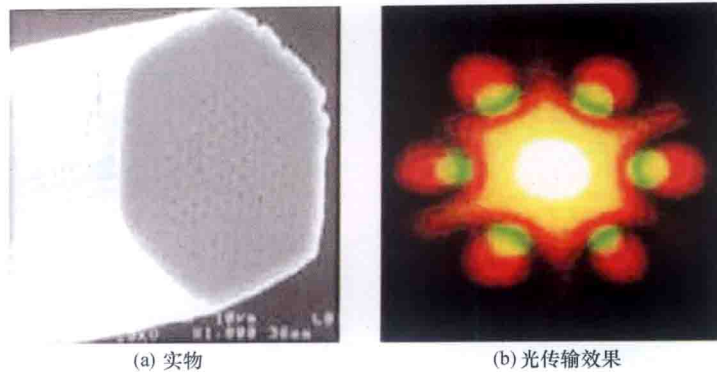


图 5.1 光子晶体光纤

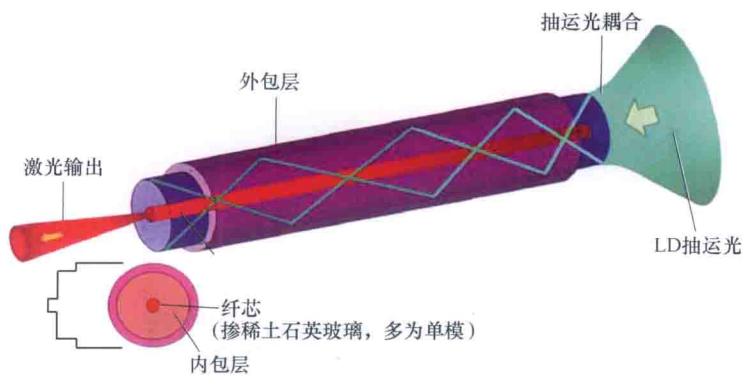


图 5.12 双包层掺杂光纤包层抽运原理

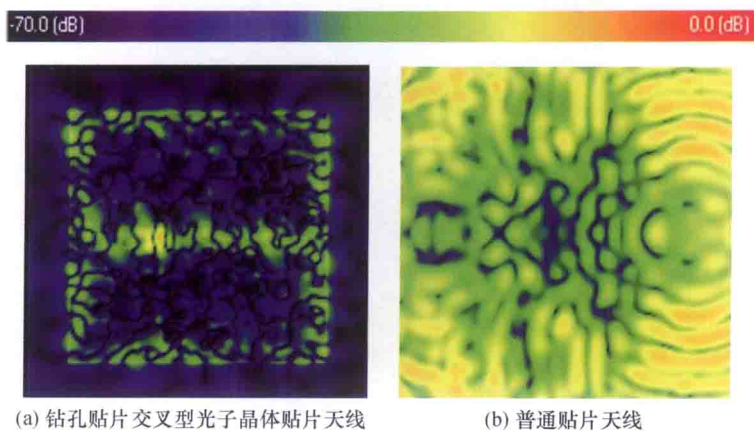


图 7.15 天线表面波电场分布

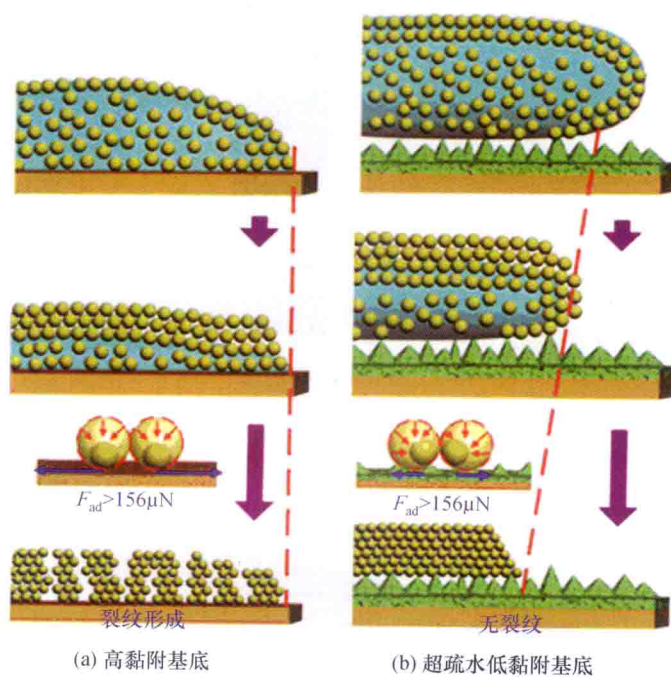


图 8.7 光子晶体膜组装机理图

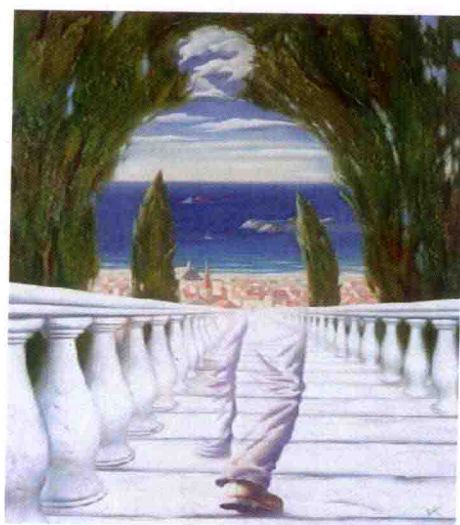


图 8.9 隐身斗篷实现效果

序

1987年由Yablonovitch和John提出了光子晶体概念。光子晶体是由不同折射率的电介质材料在空间呈周期排列而构成的晶体结构,具备自然界物质没有的超常物理属性,是一种超材料。光子晶体所具有的光子禁带、光子局域、负折射等特有属性,对新材料的发展具有深远的影响。

光子晶体有着广泛的用途:在装备电磁防护技术中,利用光子晶体的“电磁波裁剪”,通过光子晶体结构设计调控禁带的频段,可以实现电磁防护频段和防护效能的任意调控;光子晶体结构在高温目标的红外抑制、多波段宽频隐身等方面具有明显的优势,通过对负折射光子晶体结构设计,可实现装备的“斗篷”式隐身;将光子晶体结构的禁带特性与介质中的电致变色特性结合,在装备隐身技术和自适应迷彩伪装技术方面具有很好的应用前景。随着对光子晶体研究的深入,越来越多的人认识到它为材料科学、光学工程、电磁防护、隐身技术等领域的发展创造了新的契机。因此,光子晶体将有可能成为未来装备建设所依赖的一种新材料。

本书介绍了光子晶体材料及元器件的工作原理,并将光子晶体的光学理论扩展到电磁波领域,重点介绍了光子晶体在电磁防护中的应用,为电磁防护提出了许多新的理念和技术途径。

本书学术思想新颖,内容具体实用,是光子晶体与电磁防护、微波天线、隐身技术等多学科相结合的一本好书,对国防科技和信息装备发展具有积极推动作用。该书的出版可满足从事光子晶体技术研究工作的科研人员和工程技术人员的迫切需要。同时对相关专业研究人员和工程技术人员亦有重要的参考价值。

中国工程院院士

前 言

光子晶体(Photonic Crystals)的概念最早是1987年由Yablonovitch和John在讨论周期性电介质结构对光传播行为的影响时提出的。光子晶体是由不同折射率的电介质材料在空间呈周期排列而构成的晶体结构,是一种超材料,是材料科学、光学、电磁学、微纳米加工技术与集成技术相结合的一门新兴交叉学科。有关光子晶体的研究揭示了一系列突破传统认识的新电磁学现象,开辟了一系列新的研究领域。对于材料科学、物理学、光学工程等学科的发展和光电子器件以及电磁防护与隐身技术领域的研究创造了新的契机。

光子晶体能够精确控制光子的行为,实现对电磁波的“任意裁剪”;具备自然界物质没有的超常物理属性(如光子禁带、光子局域、负折射等)。这些将对信息技术、光电子产业和新材料的发展产生深远的影响。近年来,国内外专家和学者对光子晶体进行了深入研究,已由理论研究为主转向实际应用研究为主。无论是理论分析、实验制备,还是工程应用方面都展现出了丰硕的研究成果和巨大的应用潜能,并且有关光子晶体的研究领域在不断拓展。随着应用领域由光波向电磁波频段的扩展,光子晶体在整个电磁波谱的研究价值日益凸显,其在电磁防护、微波天线、隐身技术、微波电路等方面有望突破传统材料难以克服的技术瓶颈。由此,光子晶体将在光电子应用领域有重要发展前景。

在这一背景之下,著者团队紧跟光子晶体国际发展前沿,成立了光子晶体电磁防护研究小组,开展了光子晶体在电磁防护应用领域相关课题的探索研究,已取得了多项研究成果。著者团队在光子晶体理论计算、结构设计及控制技术方面也有自己的独特心得。同时,在电磁防护、隐身技术等领域,通过对光子晶体中的一维光子带隙材料和二维/三维光子晶体的理论设计、组装制备和性能研究等方向开展了大量的研究工作,在关键技术指标方面取得了突破。这些都为本书的撰写奠定了基础。

本书在光子晶体基本概念、原理、设计制备和发展历程基础上,介绍了光子晶体结构和元器件的原理及应用,将光子晶体光学理论扩展到电磁波领域,重点介绍了光子晶体在电磁防护、隐身技术和天线技术中的应用。本书共8章,各章内容如下:第1章概述光子晶体结构、独特的物理现象、发展历程及其主要应用领域;第2

章总结了光子晶体的数值分析方法、光子晶体能带理论和数值仿真软件;第3章着重讨论了负折射光子晶体产生的机理、特性及应用前景;第4章系统介绍了光子晶体的制备、可调光子晶体制备和缺陷控制等制备方法及工艺;第5章介绍并分析了光子晶体光纤、光子晶体激光器、光子晶体传感器等元器件的设计原理及应用研究,突出了光子晶体器件与传统器件的不同及应用前景;第6章分析了光子晶体在电磁防护中的屏蔽和吸波工作机理,介绍了光子晶体在电磁屏蔽材料、热红外隐身、吸波隐身领域的应用;第7章介绍了光子晶体在微带天线和相控阵天线方面的工作机理及其应用技术;第8章在现有研究基础之上,简述了光子晶体的发展趋势,重点介绍了光子晶体缺陷的引入、可调制光子晶体、等离子体光子晶体、光子晶体太赫兹器件,对光子晶体在电磁防护和天线领域的应用进行了展望。

由于光子晶体是一门新兴交叉学科,本书在编写过程中,考虑到读者不同的知识背景,对于相关知识也从光子晶体角度做了一定程度的阐述,以帮助读者更好地理解本书内容。目前,国内已有几部较为成熟的光子晶体书籍,有一定的理论深度且联系实际,但有关光子晶体理论在电磁波谱中的广泛研究及其在电磁防护、隐身技术等领域中的重要地位的阐述,是本书的特色之处,反应了光子晶体的最新研究动态和发展趋势。

多年来,著者团队在从事电磁防护技术的研究中,得到了中国工程院刘尚合院士的指导和帮助。在本书撰写过程中,同样得到刘院士的关心、支持和帮助。总装备部电子信息基础部刘成海副部长在著者多年管理工作及装备电磁防护技术领域的新材料、新技术研究方面,都及时地给予了支持和帮助;在本书内容的技术研究、撰写与书稿出版过程中,也得到了刘副部长的推动和鼓励。在此一并表示诚挚的感谢!

在此,还要感谢著者研究与撰写团队长期的愉快合作。赵亚丽、李克训在光子晶体、电磁防护方面做了大量的实验验证,为本书奠定了重要的基础。刘焘、夏晓佳、乔妙杰在技术情报收集与处理、技术研究、标准化方面对本书做出了重要贡献。另外,许多单位、学校的实验室技术人员和研究生,为本书著述提供了重要测试数据及参考资料,在此一并致谢!

限于著者水平,书中取材不当、叙述不清或者错误之处在所难免,恳请读者批评指正!

刘泰康

目 录

第 1 章 光子晶体概述	1
1.1 引言	1
1.2 光子晶体的奇特物理现象	2
1.2.1 天然光子晶体的结构色	2
1.2.2 人造光子晶体结构的负折射现象	3
1.2.3 光子晶体结构的 Purcell 效应	4
1.3 光子晶体结构特征	4
1.3.1 光子晶体基本概念	4
1.3.2 光子晶体结构类型	4
1.4 光子晶体的应用	6
1.5 光子晶体发展历程	10
1.5.1 光子晶体发展	10
1.5.2 光子晶体的未来	11
第 2 章 光子晶体理论及分析方法	13
2.1 光子晶体与电子晶体	13
2.1.1 光子晶体与电子晶体的基本原理	13
2.1.2 光子晶体与电子晶体的比较	15
2.2 光子晶体的数值分析方法	18
2.2.1 平面波展开法	20
2.2.2 传输矩阵法	23
2.2.3 时域有限差分法	24
2.2.4 N 阶法	26
2.2.5 多重散射法	27
2.3 一维光子晶体能带理论	27
2.4 二维光子晶体能带理论	31
2.5 光子晶体数值仿真软件	33
2.5.1 F2P 软件	33

2.5.2	Rsoft 软件	34
2.5.3	Matlab 软件	35
2.5.4	计算工具	35
2.5.5	计算机仿真	37
第 3 章	负折射率光子晶体	39
3.1	光子晶体负折射现象及原理	39
3.1.1	负折射现象	39
3.1.2	光子晶体负折射原理	40
3.2	负折射率光子晶体的特性	40
3.3	一维光子晶体负折射现象	41
3.4	二维光子晶体负折射现象	42
3.5	负折射率光子晶体的应用	43
3.5.1	在隐身技术方面的应用	43
3.5.2	在超灵敏探测仪器中的应用	44
3.5.3	在雷达天线和通信器件中的应用	45
第 4 章	光子晶体的制备方法	47
4.1	光子晶体结构制备	47
4.1.1	精密机械加工法	47
4.1.2	交替沉膜法	48
4.1.3	层层叠加法	48
4.1.4	半导体工艺法	50
4.1.5	微细加工法	50
4.1.6	多光束干涉法	50
4.1.7	胶体自组装法	52
4.1.8	模板法	55
4.2	反蛋白石结构制备	55
4.2.1	沉积法	56
4.2.2	电化学法	57
4.2.3	化学气相沉积法	57
4.3	可调光子晶体结构制备	58
4.3.1	改变介质材料	58
4.3.2	调整介质层厚度	59
4.3.3	介质层叠加法	59
4.4	光子晶体缺陷及其引入	61

4.4.1	光子晶体缺陷	61
4.4.2	光子晶体缺陷的引入	66
4.4.3	反蛋白石结构中缺陷的引入	67
第5章	光子晶体器件设计原理及应用	69
5.1	光子晶体光纤	69
5.1.1	光子晶体光纤原理、分类及特性	70
5.1.2	光子晶体光纤的制作方法	81
5.1.3	光子晶体光纤的应用	82
5.2	光子晶体激光器	84
5.2.1	光子晶体激光器原理、类型及特性	84
5.2.2	光子晶体激光器的应用	90
5.2.3	光子晶体激光器的不足	91
5.3	光子晶体传感器	91
5.3.1	光子晶体传感原理及特性	91
5.3.2	光子晶体传感器应用	97
5.4	光子晶体其他应用	97
5.4.1	光子晶体线缺陷波导	97
5.4.2	光子晶体太赫兹波导	100
第6章	光子晶体电磁防护材料	109
6.1	光子晶体电磁屏蔽材料	109
6.1.1	电磁干扰与电磁屏蔽原理	109
6.1.2	光子晶体电磁屏蔽材料的优势	112
6.1.3	光子晶体电磁屏蔽可视材料	114
6.2	光子晶体热红外隐身	115
6.2.1	热红外隐身机理	116
6.2.2	光子晶体热红外隐身机理	116
6.2.3	光子晶体的热红外隐身应用前景	117
6.3	光子晶体电磁波吸收材料	121
6.3.1	微波光子晶体结构	122
6.3.2	带隙结构电磁吸收材料	123
第7章	光子晶体天线技术及应用	128
7.1	光子晶体在微带天线中的应用	128
7.1.1	微带天线的类型	129

7.1.2	光子晶体在微带天线中的应用	130
7.1.3	光子晶体贴片天线	134
7.2	光子晶体在相控阵天线中的应用	138
7.2.1	相控阵天线	138
7.2.2	相控阵天线单元间的互耦	139
7.2.3	光子晶体相控阵天线去耦	143
7.2.4	基于光子晶体不同排列缝隙相控阵的去耦仿真分析	148
7.3	光子晶体在天线中的应用前景	152
第8章	光子晶体展望	155
8.1	光子晶体类型发展方向	155
8.1.1	带隙可调光子晶体	155
8.1.2	等离子体光子晶体	159
8.1.3	含缺陷态光子晶体	161
8.1.4	纳米光子晶体	162
8.2	光子晶体未来领域发展方向	162
8.2.1	耐千余摄氏度高温的光子晶体	162
8.2.2	光子晶体纳米仿生技术	163
8.2.3	光子晶体器件	164
8.2.4	光子晶体太赫兹器件	166
8.2.5	光子晶体电磁防护	167
8.3	光子晶体技术发展方向	168
参考文献		171

第1章 光子晶体概述

1.1 引言

光子晶体是近年来迅速发展起来的一种介电常数随空间周期性变化的新型结构材料。光子晶体由于某些奇特的物理现象而成为一种典型的超材料。超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料。通过在关键物理尺度上的结构有序设计,可以突破某些自然规律的限制,从而获得超出自然界固有的普通性质的超常材料功能。超材料的出现,打破了传统材料的设计理念,突破了传统材料本征性能的束缚。随着科学技术的飞速发展,各种传统材料的应用潜力被不断地开发并趋于极限,因此,在某些实际应用方面依靠传统材料已无法解决。

光子晶体的出现,将有可能产生一场新的革命——光子革命。其对科学技术产生的影响不亚于20世纪50年代开始的微电子学革命。以微电子学为基础的信息革命正以前所未有的速度推动着科学发展和人类文明的进步。微电子是建立在半导体材料对电子的精确控制基础之上的。但由于半导体器件的速度和集成度已接近极限,以电子为信息载体的信息技术的发展遭遇“电子瓶颈”。通过设计光子晶体结构可实现对光子的任意调控。光子有着许多与生俱来的优点,如传播速度快、频率高、无相互作用等,因而光子器件具有极短的响应时间、较宽的频带、很好的空间相容性和很强的抗干扰能力、极强的互连能力和极大的存储能力。用光子晶体器件来替代传统的电子器件,可使信息通信的速度快得无法想象。

光子晶体的出现,无疑给许多新领域中的元件、器件和部件设计与构造带来新的契机:利用光子晶体的光子带隙和光子局域的特征,使其在光电子器件、通信领域、电磁防护领域和微波天线领域得到广泛而重要的应用;利用光子晶体的有序多孔性和光子带隙的可调节性,可以制作各种类型的传感器;利用光子晶体禁带特性的完全带隙光子晶体和不完全带隙光子晶体,可以控制电磁波的传播,禁止电磁波传播或精确控制电磁波传播方向。随着对频域扩展的进一步研究,将会对电磁防护可视材料、滤波器件等产生全新意义上的重大影响;利用光子晶体的结构颜色和莲花效应,可以制备装饰材料、仿生材料和自清洁材料。光子晶体的主导思想就是利用光子禁带或禁带结构中的缺陷态来改变光子晶体中某种电磁态的密度,以制作全新原理或以前所不能制作的高性能器件。光子晶体被称为21世纪的半导体,

具有巨大的应用潜力。由于光子晶体具有可根据需求对电磁波实行“任意剪裁”的独特性能,因此,它为电磁波领域提供了全新的研究方向,已经在电磁防护、隐身技术、微波天线、微波电路等方面表现出广阔的应用前景。

1.2 光子晶体的奇特物理现象

光子晶体具有特殊的周期性结构,因而表现出许多奇特的物理性质和现象,如天然蛋白石绚丽夺目的结构色彩,人工合成光子晶体的超棱镜效应、负折射效应、双折射现象、能量转移、光子压缩态、光子双稳态、光多稳态及光学限制等特性。

1.2.1 天然光子晶体的结构色

自然界中存在的某些天然结构,如盛产于澳大利亚的蛋白石、蝴蝶翅膀以及海鼠毛,是天然光子晶体结构典型的例子。蛋白石是一种天然名贵宝石,其绚丽夺目的色彩与蛋白石本身的色素无关,而与其自身结构有关。其结构呈周期性规则排列,存在光子能带和光子带隙,随着带隙位置的不同,反射光的色彩随之而变,因而就产生了不同的绚丽色彩。如图 1.1 所示,电子显微镜可以清楚地看到它们是由一些周期性微结构组成的。蝴蝶翅膀、海鼠毛色彩的呈现,是由于在不同的方向上,有不同频率的光在这种周期性结构中被散射和透射的结果。然而,这些天然物质没有三维的完全光子带隙。光子晶体的大部分应用是建立在完全光子带隙基础之上的。

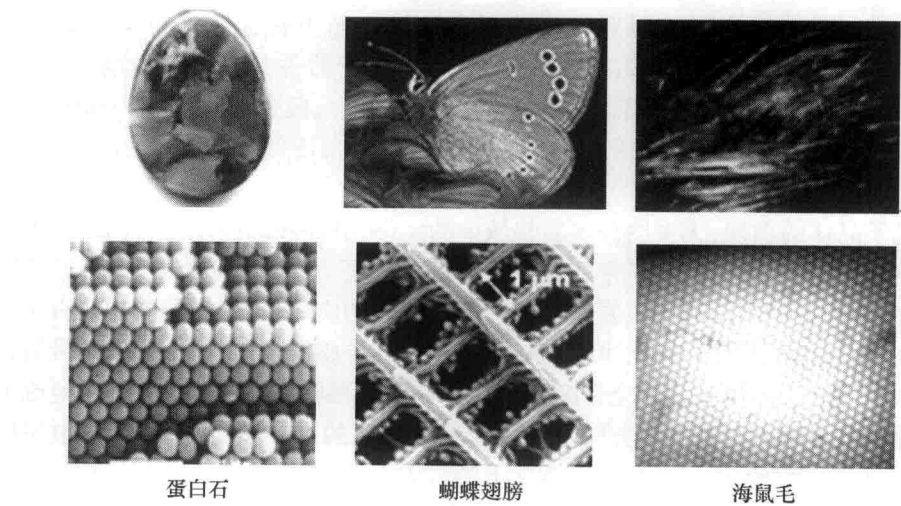


图 1.1 光子晶体在自然界中的例子(见彩色插页)

1.2.2 人造光子晶体结构的负折射现象

负折射现象是当光波从正折射率材料入射到负折射率材料的界面时,光波的折射现象与常规折射相反,折射波和入射波处在界面法线方向同一侧,如图 1.2 所示。这一特性在许多方面都具有潜在的应用价值。负折射现象最早是由苏联科学家 Veselago 在 1968 年提出的。

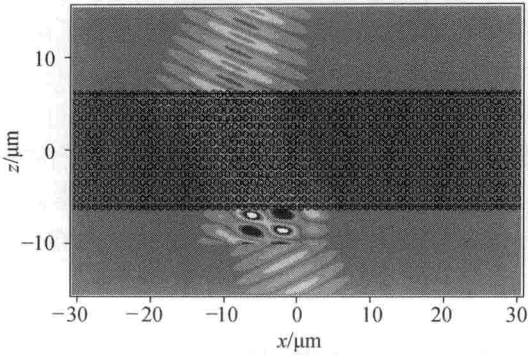


图 1.2 光子晶体中的负折射现象(见彩色插页)

然而,负折射现象在自然界中并不存在。光通常穿过普通介质时具有正折射角,即入射光线和折射光线在法线的两侧,如图 1.3 所示。但在负折射率介质中具有负折射角,能流方向与波矢相反。

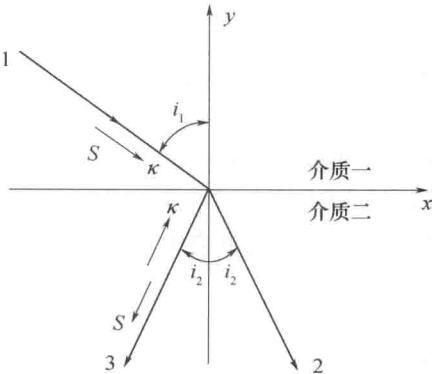


图 1.3 折射和负折射现象

1—入射光;2—当介质二为正折射率材料时的折射光;3—当介质二为负折射率材料时的折射光,
即介电常数和磁导率都为负值时的介质中能流密度 S 和波矢 κ 方向相反。

到目前为止,负折射率介质主要通过矩形或圆形分裂环谐振腔、背景媒质中的导电小粒子或夹杂物、光子晶体结构、L-C 微波带线或器件来实现。但是目前提出的大部分负折射都伴随强烈的色散,出现负折射现象的频带非常窄。而利用光子晶体